

中子与 $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ 反应的理论计算和分析*

韩银录¹⁾

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 根据中子与天然 Zr 及其同位素反应的总截面,去弹截面和弹性散射角分布的实验数据,得到一组普适的光学模型势参数;应用得到的光学模型势参数,光学模型,Hauser-Feshbach 理论,预平衡反应的激子模型和扭曲波玻恩近似理论,系统计算和分析了中子与 $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ 反应的非弹散射角分布和双微分截面,理论结果与实验很好的一致.

关键词 光学模型势 扭曲波玻恩近似理论 非弹散射角分布 双微分截面

1 引言

通过分析中子与原子核反应的非弹性散射角分布实验数据,并应用相关的理论模型,可以得到原子核结构的一些信息.例如,原子核振动模型的四级和八级变形参数等,同时比较从中子反应获得的实验测量结果与从质子反应获得的实验测量结果,可研究核反应中的同位旋效应.由于 ^{90}Zr 是单闭壳核(中子数 $N = 50$).因此,系统的计算和分析中子与核反应的非弹性散射角分布,对原子核结构的研究以及反应截面的系统学规律具有重要的意义,为推广到非稳定核的理论计算提供方法.

在以前的国内外研究工作中^[1],只对某一个核或者某一能量的非弹性散射角分布进行计算分析;而光学模型势仅通过符合弹性散射角分布的实验数据得到;另外复合核反应过程没有考虑.本工作利用 Zr 和其同位素的中子反应的总截面,去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据,给出入射中子能量在 30MeV 以下,一组普适的中子与 Zr 及其同位素反应的光学模型势参数;应用扭曲波玻恩近似理论,核反应统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论,系统地计算和分析中子与 $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ 反应分立能级的非弹性散射角分布和总发射中子的双微分截面.

2 理论模型和参数

光学模型描述核反应的势散射和吸收,并且光学模型势也为扭曲波玻恩近似理论提供了核子与原子核的相互作用势.在本工作中应用了 Woods-Saxon^[2]势形式.由于天然核 Zr 有 5 个同位素,天然核有较多的总截面、去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据,而同位素只有总截面和弹性散射角分布的实验数据.本工作选择了丰度最大的 ^{90}Zr (50.59%),利用天然核中子反应的总截面,去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据, ^{90}Zr 的总截面和弹性散射角分布的实验数据以及光学模型程序 APMN^[3],在入射中子能量 $E_n \leq 30$ MeV,获得了一组普适的 ^{90}Zr 中子光学模型势参数.结果为:

光学模型势的实部:

$$V = 55.4963 - 0.6740E + 0.01606E^2 - 24.0(N - Z)/A, \quad (1)$$

虚部势的面吸收部分:

$$W_S = 8.4661 + 0.0195E - 12.0(N - Z)/A, \quad (2)$$

虚部势的体吸收部分:

$$W_V = -1.8639 + 0.1573E - 0.002538E^2, \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势:

$$U_{so} = 6.2, \quad (4)$$

2004-02-24 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022603)资助

1)E-mail:han@iris.ciae.ac.cn

光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋 - 轨道耦合势的半径分别为

$$r_r = 1.1691, r_s = 1.3019, \tag{5}$$

$$r_v = 1.3181, r_{so} = 1.1691.$$

光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋 - 轨道耦合势的弥散宽度分别为

$$a_r = 0.7760, a_s = 0.4962, \tag{6}$$

$$a_v = 0.4523, a_{so} = 0.7760.$$

其中 Z, N, A 分别表示靶核的电荷数, 中子数和质量数. E 是入射中子在质心系中的能量. V, W_S, W_V, U_{so}, E 以 MeV 为单位, $r_r, r_s, r_v, r_{so}, a_r, a_s, a_v, a_{so}$ 以 fm 为单位.

应用这一组光学模型势参数, 分别对 neutron 与天然核 Zr 及其 5 个同位素的反应总截面, 弹性散射截面, 弹性散射角分布和天然核 Zr 的去弹性散射截面进行了理论计算并与其相应的实验数据进行了比较. 结果表明, 得到的普适 neutron 光学模型势参数能够很好的再现实验数据并适用于天然核 Zr 及其 5 个同位素. 作为例子, 图 1 和图 2 仅给出 ^{90}Zr 中子总截面和弹性散射角分布的理论计算结果与实验数据的比较, 结果表示与实验测量数据得到了很好的符合.

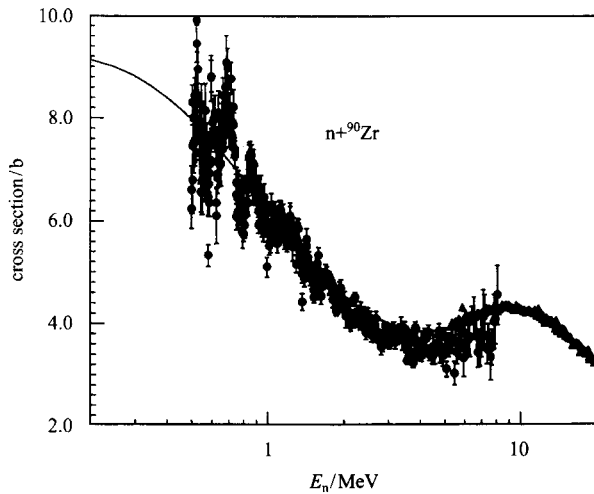


图 1 中子与 ^{90}Zr 反应的总截面

扭曲波玻恩近似理论描述核反应的直接反应过程^[4]. 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论^[5, 6] 分别描述核反应的平衡和预平衡反应过程.

3 计算结果及分析

应用获得的光学模型势参数和包括光学模型,

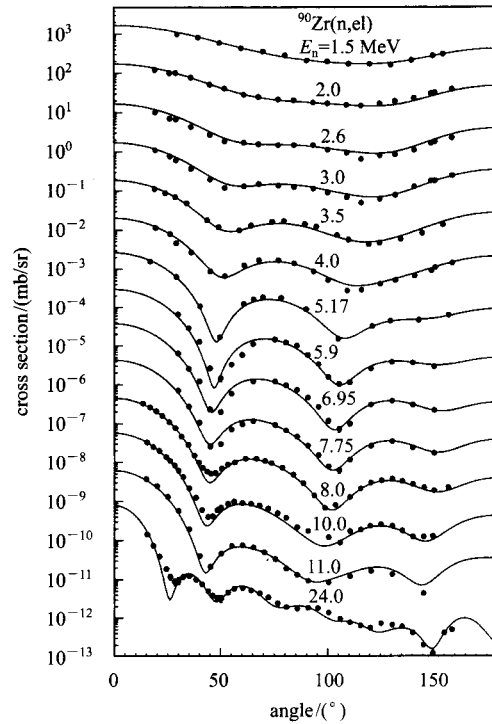


图 2 ^{90}Zr 中子弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别
乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^{13}$.

统一的 Hauser-Feshbach 理论和激子模型的理论计算程序 UNF^[7], 扭曲波玻恩近似理论, 分别计算了中子与 $^{90}\text{Zr}, ^{91}\text{Zr}, ^{92}\text{Zr}$ 和 ^{94}Zr 反应的截面和角分布. 通过符合分离能级角分布的实验数据, 得到了相应能级的变形参数, 并在表 1 中给出.

表 1 激发态的变形参数 β

^{90}Zr		^{91}Zr		^{92}Zr		^{94}Zr	
$\epsilon J\pi$	β	$\epsilon J\pi$	β	$\epsilon J\pi$	β	$\epsilon J\pi$	β
2.1863 2^+	0.104	1.2048 $1/2^+$	0.056	0.9345 2^+	0.101	0.9187 2^+	0.101
2.3190 5^-	0.123	1.4664 $5/1^+$	0.031	1.8473 2^+	0.049	1.4693 4^+	0.060
2.7479 3^-	0.181	1.8822 $7/2^+$	0.042	2.0667 2^+	0.045	1.6714 2^+	0.060
3.0769 4^+	0.106	2.0423 $3/2^+$	0.042	2.3398 3^-	0.168	2.0576 3^-	0.160
3.3088 2^+	0.106	2.1315 $9/2^+$	0.044			2.1513 2^+	0.057

其中 ϵ 表示分立能级能量, J, π 分别表示该能级的自旋与宇称.

图 3 和图 4 是入射中子能量分别为 2.75, 2.91, 6.95, 7.75, 8.0, 11.0 和 24.0 MeV, 中子与 ^{90}Zr 反应时, ^{90}Zr 的第二激发态(激发能、自旋和宇称为 $\epsilon = 2.186 2^+$)和第五激发态($\epsilon = 2.748 3^-$)的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据^[8-12] 的比较. 从图中可以看出, 第五激发态的角分布理论计算

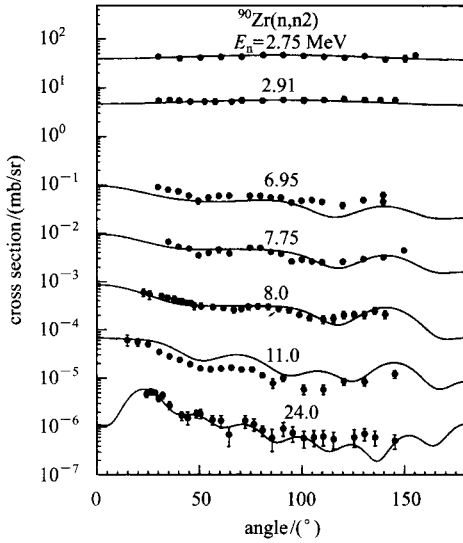


图 3 ^{90}Zr 第二激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^6$.

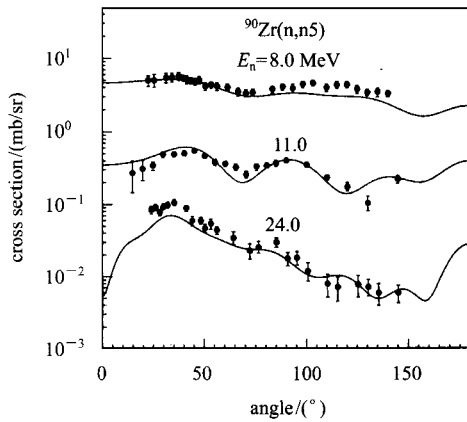


图 4 ^{90}Zr 第五激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2$.

结果与实验数据不论是峰谷的位置,还是振幅的大小都符合的很好.而第二激发态的角分布理论计算结果在入射中子能量分别为 2.75, 2.91, 7.75, 8.0 和 24.0 MeV 与实验数据很好的符合;入射中子能量分别为 6.95 和 11.0 MeV 时,理论计算值与实验值有一定分歧.图 5 给出了中子与 ^{92}Zr 反应第一、二、三激发态和第五激发态,在中子能量为 8 MeV 的角分布理论计算结果与实验数据的比较,理论计算结果与实验数据符合,实验数据来自文献[1].入射中子能量为 8.0 MeV,中子与 ^{94}Zr 反应分立能级角分布理论计算与实验数据的比较结果显示,理论计算与实验数据很好的符合,如图 6 所示.中子能量为 8.0 MeV,中子与 ^{91}Zr 反应在不同分立能级时的角分布理论计算与实验很好的一致,如图 7 所示.

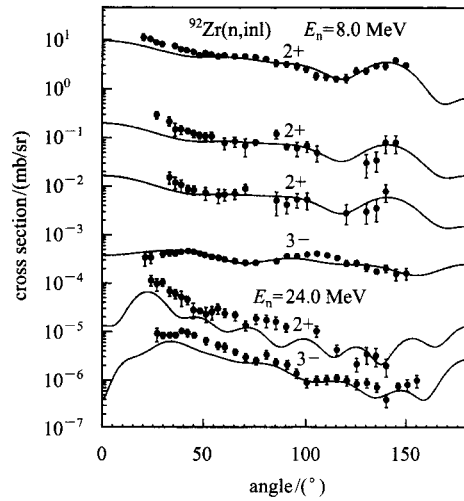


图 5 ^{92}Zr 激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^5$.

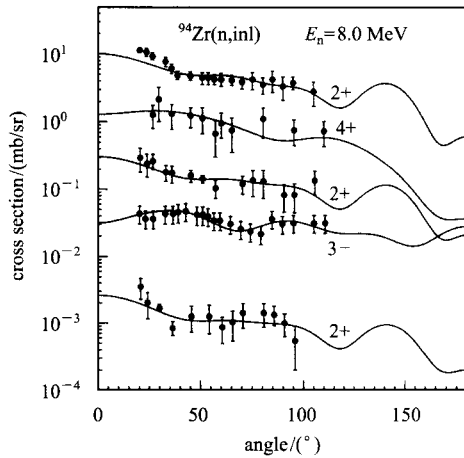


图 6 ^{94}Zr 激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^0, 10^1, 10^2, 10^3$.

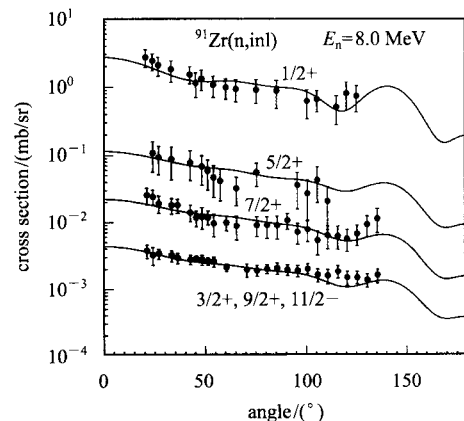


图 7 ^{91}Zr 激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, 10^3$.

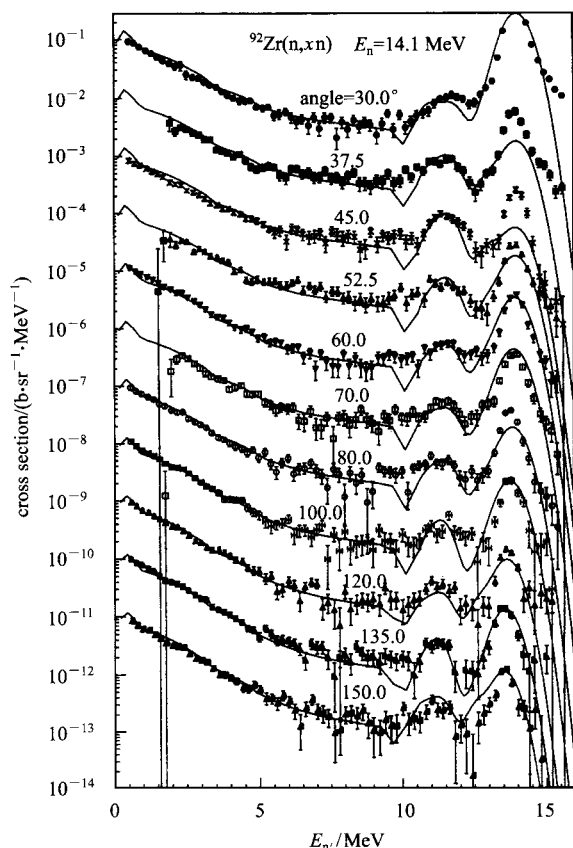


图 8 ^{92}Zr 总中子发射双微分截面

从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^{10}$.

从理论计算中也可以看出,在入射中子能量大约 5 MeV 以下,分立能级的非弹性散射角分布主要是复合核反应的贡献,在 5 MeV 以上,主要是直接反应的贡献.并且非弹性散射角分布的形状由直接反应给出.

通过理论模型计算,得到了中子引起的核反应分立能级的变形参数,与文献[1]中的结果比较,现在的结果明显的大于他们的结果,这是由于原来计算未能将平衡和预平衡核反应过程贡献充分细致的考虑.现在的工作系统地研究了 Zr 的所有同位素,并且包括了较宽的能区.而文献[1]中,分别在在中子

能量为 8.0, 10.0 和 24.0 MeV,不同的核分别用不同组的光学模型势参数,并在此基础上,得到了中子核反应分立能级的变形参数.本工作在很宽的能区内仅使用一组光学势参数.因此,本工作给出的变形参数普适性和适用性更强.

在本工作中得到的中子核反应分立能级的变形参数与文献[13]中 Pb 的结果有相似之处,即都是中子反应分立能级的变形参数大于质子反应分立能级的变形参数,而与文献[14]中 Sn 的结果相反,但都显示壳模型的单粒子效应.

在所有的反应截面与实验结果符合的基础上,对中子发射的双微分截面进行了理论计算,作为例子,图 8 给出了入射中子能量为 14.1 MeV,中子与 ^{92}Zr 反应的中子发射双微分截面理论与实验结果^[15]的比较.理论与实验结果很好地一致.其中两个峰是弹性道和非弹性道分立能级的贡献.双微分截面的结果表明,分立能级非弹性散射的理论计算结果是合理的.

4 结语

在中子与天然核 Zr 和其同位素反应的总截面,去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据基础上,应用光学模型程序 APMN,在入射中子能量从 0.1—30 MeV 范围内,获得了一组普适的 ^{90}Zr 核的中子光学模型势参数;这组参数能很好地再现中子与天然核 Zr 和其同位素反应的总截面,去弹性散射截面,弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据.应用光学模型势参数,扭曲波玻恩近似理论,统一的 Hauser-Feshbach 理论和激子模型理论计算程序 UNF,对中子与 $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ 反应分立能级的非弹性散射角分布和中子发射的双微分截面进行了理论计算和分析,理论计算结果和实验数据进行了比较,计算结果与实验数据很好的符合.在此基础上,得到了中子核反应中原子核分立能级的变形参数,为研究原子核的同位旋相关性质提供了合理的基础数据.

参考文献 (References)

- 1 WANG Y, Rapaport J. Nucl. Phys., 1990, **A517**:301
- 2 Becchetti Jr F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, **182**:1190
- 3 SHEN Qing-Biao. Nucl. Sci. Eng., 2002, **141**:78
- 4 Kunz P D. Distorted Wave Code DWUCK4, University of Colorado
- 5 SUN Z et al. Z. Phys., 1982, **A305**:61
- 6 ZHANG Jing-Shang. Nucl. Sci. Eng., 1992, **114**:55
- 7 ZHANG Jing-Shang. Nucl. Sci. Eng., 2002, **142**:207
- 8 Finlay R W, Hadizad M H et al. Nucl. Phys., 1980, **A344**:257
- 9 Bainum D E, Finlay R W et al. Nucl. Phys., 1978, **A311**:492
- 10 Daniel F D MC, Brandenberger J D et al. A-KTY-74/77, 1977, 34
- 11 Wilson R D. WILSON, 1973
- 12 Tanaka S, Yamanouti Y. NEANDC (J)-51/U, 11, 1977
- 13 HAN Yin-Lu. HEP & NP, 2004, **28**:48 (in Chinese)
(韩银录. 高能物理与核物理, 2004, **28**:48)
- 14 HAN Yin-Lu. HEP & NP, 2003, **27**:436 (in Chinese)
(韩银录. 高能物理与核物理, 2003, **27**:436)
- 15 Chiba S, Ishikawa M et al. NETU-49, 1987

Theoretical Calculations and Analysis for $n + ^{90,91,92,94}\text{Zr}$ Reactions *HAN Yin-Lu¹⁾

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract By fitting the experimental data of total, nonelastic and elastic scattering angular distributions for $n + \text{Zr}$ reactions, a set of neutron optical model potential parameters is obtained. The inelastic scattering angular distributions of discrete levels and double differential cross sections are calculated and analyzed by using the distorted wave Born approximation theory based on the unified Hauser-Feshbach and the exciton model. With the fitting procedure the neutron induced level deformation parameters are obtained. The results indicate that the calculated results of the inelastic scattering angular distributions and total outgoing neutron double-differential cross sections for $n + ^{90,91,92,94}\text{Zr}$ can be obtained, which are all in good agreement with the experimental data.

Key words neutron optical model potential, distorted wave Born approximation, inelastic scattering angular distribution, double differential cross section

Received 24 February 2004

* Supported by China Ministry of Science and Technology(G1999022603)

1) E-mail: han@iris.ciae.ac.cn